

TÁVÉRZÉKELÉS ÉS FELSZÍNALAKTAN:

Keringőegység-adatok térinformatikai integrálása a Mars jeges lejtőformáinak vizsgálatához

című doktori értekezés tézisei

SIK ANDRÁS

Témavezetők:

Dr. Gábris Gyula D.Sc., egyetemi tanár

Dr. Mari László Ph.D., egyetemi docens

Doktori Iskola:

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Földtudományi Doktori Iskola

Vezetője: Dr. Gábris Gyula D.Sc., egyetemi tanár

Doktori Program:

Földrajz-Meteorológia Doktori Program

Vezetője: Dr. Nemes-Nagy József D.Sc., egyetemi tanár

Kutatóhely:

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi Intézet,

Természetföldrajzi Tanszék (ELTE TTK FFI TEF), valamint Planetológiai Műhely (ELTE TTK FFI PM)

Budapest, 2011

I. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A Mars kozmikus környezetünk legalaposabban vizsgált, legdinamikusabban változó és legizgalmasabb égitestje. A XX. század utolsó éveitől kezdve a Naprendszer-kutatással kapcsolatos erőfeszítéseknek legalább a fele kizárólag ennek a különleges világnak a megismerésére irányul. Többek között azért lettem geográfus, mert a gimnáziumi csillagászat szakkörben egyre gyakrabban foglalkoztunk formakincsével, s tantárgyaim közül a földrajz állt a legközelebbi kapcsolatban a bolygók és holdak tanulmányozásával. Az egyetemi évek során ez a „közelség” tovább fokozódott, diplomamunkámban és Ph.D.-hallgatóként is az égitest felszínalaktani sajátosságait vizsgáltam, miközben tagja lettem a Collegium Budapest – Institute for Advanced Study által működtetett Mars Astrobiology Group nevű kutatócsoportnak, amely egy magyar szakemberek által kidolgozott, a bolygó felszíni környezetének életfeltételeit vizsgáló elmélettel foglalkozik, az Európai Űrügynökség támogatásával.

Így disszertációm csak egy részét jelenti Marssal kapcsolatos kutatómunkámnak, továbbá saját eredményeim mellett általánosabb jellegű fejezeteket is tartalmaz. Célkítűzései pedig az alábbiak:

- a Mars-kutatás történetének, valamint az égitestről rendelkezésre álló s legszélesebb körben elfogadott tudásanyagának a naprakész és rövid, magyar nyelvű áttekintése;
- a bolygó felszínének távérzékelési/térinformatikai eljárásokkal zajló vizsgálatához szükséges módszertani ismeretek és weboldalak részletes bemutatása, ami remélhetőleg hasznos iránymutatást jelent majd az űrszondák, műszerek, vonatkoztatási rendszerek, adatforrások és file-formátumok egyre bonyolultabb útvesztőjében azon fiatal Mars-kutatók számára, akik erre a kalandos, de helyenként nehezen járható ösvényre lépnek;
- egy olyan számítógépes munkamenet kidolgozása s – tudomásom szerint hiánypótló – dokumentálása, amely Microsoft Windows operációs rendszeren működő, általános célú térinformatikai szoftverrel teszi lehetővé az eltérő küldetésekből származó űrfelvételek és mérési eredmények integrált kezelését, térképi megjelenítését valamint interpretációját;
- ezt használva a közepes marsrajzi szélességeken található periglaciális törmelékletjők morfológiai elemzési lehetőségeinek bemutatása és szintézise négy mintaterület alapján;
- szintén a kidolgozott munkamenet alkalmazásával, a szubpoláris övezet dűnemezőin megfigyelhető sötét lejtősávok jelenleg is aktív folyamatainak négy mintaterületen, különböző térinformatikai módszerekkel történő elemzése és értelmezése;
- mindezekon keresztül annak szemléltetése, hogy napjainkban már más égitestek felszínén is végezhetők részletes morfológiai vizsgálatok, s így a bolygófelszínt a természetföldrajz planetáris kiterjesztésének, vagy akár egyik ígéretes jövőbeli ágazatának is tekinthető.

II. MÓDSZERTAN, avagy FIATAL MARS-KUTATÓK KÉZIKÖNYVE

A Mars tanulmányozása távcsöves megfigyelések helyett napjainkban már a térségébe jutott űrszondákkal zajlik. A bolygó körüli pályán működő keringőegységek érzékelő-berendezései által a nyolc mintaterületről távérzékelési eljárásokkal gyűjtött optikai űrfelvételeket, digitális domborzatmodelleket (DTM) illetve más jellegű adatokat interneten keresztül elérhető, nyilvános adatbázisokból töltöttem le, majd ESRI ArcGIS Desktop 9.3 térinformatikai szoftver-környezetben dolgoztam fel, integráltam és elemeztem.

Ennek során számos technikai nehézséget kellett megoldanom, elsősorban az állományok eltérő térbeli vonatkoztatási rendszere (szferoid, fókhalózat, vetület), terepi felbontása illetve formátuma (byte-sorrend, spektrális felbontás, bináris adatszerkezet, színmélység, feldolgozottsági szint, kiterjesztés) miatt – minderről részletes módszertani útmutatót készítettem, amelyben évek alatt szerzett gyakorlati tapasztalataimat foglaltam össze a különböző típusú mérési eredmények feldolgozásával kapcsolatban.

A rendelkezésre álló globális Mars-térképek és adatforrások, illetve adatkeresési lehetőségek bemutatása, valamint a leggyakrabban használt állományok technikai sajátosságainak ismertetése után végül leírtam az általam javasolt adatintegrációs módszer egymást követő lépéseit:

- ArcMap-ben új Data Frame megnyitása, relatív állomány-elérés kiválasztása;
- a Data Frame térbeli vonatkoztatási rendszerének beállítása;
- ArcCatalog-ban egy új File geoadatbázis létrehozása, amelybe a továbbiakban – a rendkívül nagy file-méretű MRO HiRISE-felvételek kivételével – a MARS GIS-ben integrálandó minden raszteres, vektoros illetve táblázatos formátumú állomány betölthető;
- alaptérképként az MGS MOLA DTM-et érdemes használni, mivel az utóbbi évek során a MOLA térbeli vonatkoztatási rendszer széles körben elterjedt szabvánnyá vált a marsi térinformatikában;
- a Data Frame megjelenítési koordináta-típusának beállítása (az egyszerűbb tájékozódás érdekében a „Decimal Degrees” opciót érdemes kiválasztani);
- a Data Frame középső meridiánjának beállítása (célszerű a 0°-os hosszúsági kört választani);
- saját térbeli vonatkoztatási rendszerének hozzárendelése minden adatforráshoz az ArcCatalog-ban;
- az adatforrások állományaira vonatkozó felszíni lefedettség-adatok integrálása;
- ezek felhasználásával a vizsgált területről elérhető összes állomány kiválasztása, majd letöltése;
- szükség esetén az integrálandó állományok térbeli igazítása MGS MOLA DTM → MGS MOC WA → MO THEMIS → MEX HRSC → MRO CTX → MGS MOC NA → MRO HiRISE sorrendben;
- térinformatikai elemzések elvégzése, s eredményeik eltárolása a File geoadatbázisban;
- az eredmények háromdimenziós megjelenítése.

III. KÖVETKEZTETÉSEK

III.1. Módszertani összegzés

Adatfeldolgozás

- 1) Röviden áttekintettem a Mars kutatásának mérföldköveit, a formakincsével és fejlődéstörténetével kapcsolatos, legszélesebb körben elfogadott naprakész ismeretanyagot, valamint távérzékelési/térinformatikai eljárásokkal zajló vizsgálatának módszertani alapelveit.
- 2) Gyakorlati tapasztalataim összegzése és a kiválasztott nyolc marsi mintaterület részletes felszínalaktani elemzése során négy különböző keringőegységen található 11 db érzékelő-berendezés összesen kb. 400 db eltérő jellegű, térbeli vonatkoztatási rendszerű vagy vetületű, terepi felbontású, file-típusú illetve formátumú állományát dolgoztam fel. Egy globális és nyolc helyi MARSIS-t hoztam létre File geoadatbázisok, illetve ezekhez kapcsolódó ArcMap térkép-állományok (.MXD) formájában, amelyek teljes adatmennyisége kb. 75 GB (a mindezt tartalmazó digitális melléklet 16 db hagyományos kapacitású DVD-lemezből állna, ezért sokkal célszerűbbnek találtam egy HDD-meghajtóra elkészíteni).
- 3) A több küldetésből származó optikai űrfelvételek és mérési eredmények térinformatikai integrálását, térképi megjelenítését és interpretációját sikerült a Microsoft Windows operációs rendszeren működő, általános célú ESRI ArcGIS Desktop 9.3 szoftver-környezetben elvégezni, speciális feladatokra készített számítógép-programok nélkül. Munkám során arra a következtetésre jutottam, hogy a marsi térinformatikában egységesen a MOLA térbeli vonatkoztatási rendszert érdemes használni (az IAU2000 ellipszoid helyett annak megfelelő szferoid-alapfelületet beállítva), globális MARSIS esetén négyzetes hengervetülettel, helyi MARSIS kialakításakor pedig – a mintaterület marsrajzi szélességétől függően – poláris sztereografikus vagy szinuszoidális vetülettel.
- 4) A különböző adatforrások közül az MRO CRISM érzékelő-berendezés TRDR-típusú hiperspektrális állományait a legbonyolultabb feladat ArcGIS-ben megnyitni, amire – saját tapasztalataim alapján – több lépésből álló eljárást dolgoztam ki és írtam le részletesen.
- 5) Véleményem szerint egy mintaterület tágabb környezetét bemutató áttekintő fotó-térkép létrehozásához elsősorban MRO CTX-felvételeket érdemes használni, mert szinte minden esetben jobb minőségűek, mint a többi kifelbontású adatforrás. Látványosabb – viszont kevésbé részletes – színes áttekintő fotó-térkép pedig az optikai hullámhossz-tartomány vörös, zöld és kék részeit lefedő MEX HRSC-állományok RGB-kompozítjaként állítható elő, amelyet célszerű „megélesíteni” a hozzá tartozó pankromatikus nadír-felvétellel (ezt a több lépésből álló művelet-sorozatot az összes mintaterületre elvégeztem).

- 6) Az elmúlt évek során két területet is javasoltam célpontként az MRO HiRISE-kamera számára egy nyilvános weboldalon keresztül, amelyeket a berendezést működtető NASA-szakemberek 2007-ben el is készítették, s így mindkettőt fel tudtam használni kutatómunkámhoz.

Pontosság

- 7) Az eltérő térbeli vonatkoztatási rendszerű és terepi felbontású keringőegység-adatok integrálásának alapvető minőségi jellemzője illeszkedésük pontossága, amit az állományok vetületi paramétereinek beállítása csak kisfelbontású adatforrások között biztosít megfelelő mértékben, ám néhány m/pixel-nél részletesebb felvételek esetén, illetve a felszíni formakincs időbeli változásának vizsgálata során sajnos szinte mindig szükséges valamilyen „kézi” térbeli igazítási eljárás (georeferálás) alkalmazása.
- 8) Úgy tűnik számomra, hogy az 1997-2006 közötti időszakban készült, rendkívül nagyszámú MGS MOC NA-felvétel és a 2006-tól elérhető MRO HiRISE-képek összehasonlítása a felszíni formakincs időbeli változásainak keresése céljából – a két adatforrás eltérő részletessége miatt – sajnos nem igazán lehetséges.
- 9) Megállapítottam, hogy a mintaterületeken jól korrelálnak egymással a többféle forrásból származó domborzati adatok. Egy felszíni pont 0 m-es szint feletti magasság-értéke az MGS MOLA egyedi domborzati profiljain határozható meg a legbiztosabban, különböző térszínek abszolút magasság-viszonyait a globális lefedettségű – ám interpolációs eljárással készült, s emiatt kevésbé pontos – MGS MOLA DTM alapján célszerű összehasonlítani, egy térség morfológiai vizsgálatához pedig – amennyiben rendelkezésre áll – az optikai űrfelvételek sztereo-kiértékelésével előállított, nagyobb terepi felbontású MEX HRSC DTM-állományok használatát javaslom (amelyek véletlenszerű „zajosság”-hoz hasonló, helyi egyenetlenségeit szerintem az MGS MOLA DTM illetve a MEX HRSC DTM magasság-értékeinek pixelenként végzett átlagolásával érdemes részlegesen kisimítani).

III.2. A periglaciális törmelékletjőkre vonatkozó megállapítások

Morfológia

- 10) Négy különböző jellegű mintaterület részletes morfológiai és morfológiai tanulmányozása alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a közepes marsrajzi szélességű övezetekben található periglaciális törmelékletjők három különböző típusa (LDA, LVF, CCF) valóban azonos módon jött létre a bolygó múltjában: cementált belső szerkezetű, köves-jeges összletek lassú lejtőirányú elmozdulásával, illetve az ennek során belsejükben zajló plasztikus deformációk eredményeként, eltérő típusaik pedig a környezetük formakincse által meghatározott „domborzati kényszer”-ek hatására alakultak ki. Továbbá úgy gondolom, hogy a nagyobb kiterjedésű alakzatok nem egységes felépítésűek, hanem a különböző táplálóterületekről érkező kis törmelékfolyamok összecsatlakozó rendszerei.

- 11) A Greg kráter és a Protonilus-mintaterület vizsgálata során megállapítottam, hogy a periglaciális törmelékletjők elhelyezkedését leginkább két tényező határozza meg: a domborzat (lejtőmeredekség) és a besugárzás mértéke (lejtőkitettség). Ez pedig arra utal, hogy képződésüket besugárzás-mennyiségtől függő folyamatok – elsősorban az olvadás, illetve az aprózódás – is befolyásolják.
- 12) A Greg kráter törmeléknyelvein és az Euripus-hegyet szoknyaszerűen körbevevő lebenyes törmelékletjőn egyaránt megfigyeltem, hogy felszíni szerkezet-típusaik változnak a táplálóterület és az elvégződő szakasz között, hasonló módon: lefelé haladva egyre idősebb, lepusztultabb jellegű mintázatok követik egymást. Ezek a felszíni szerkezet-típusok szerintem jól párhuzamba állíthatók a földi periglaciális térségekben megjelenő rendezett felszíni közettörmelék-mintázatokkal.

Aktivitás

- 13) A periglaciális törmelékletjők formakincsének recens változását egyik mintaterületen sem sikerült kimutatnom – még az Euripus-hegyet szoknyaszerűen körbevevő alakzat felszínét 0,25 m/pixel terepi felbontású, egy marsi évszak különbséggel ábrázoló MRO HiRISE felvétel-pár részletes összehasonlítása alapján sem annak ellenére, hogy az elérhető két független, ám egymással jól korreláló spektrométer-adatforrás szerint a nyár legelegebb időszakában a hőmérséklet rövid ideig akár 0 °C-nál magasabb is lehet a területen.
- 14) Változatlan morfológiájuk oka véleményem szerint az, hogy nem képződik rajtuk aktív réteg, ebből pedig arra következtetek, hogy törmelékanyaguk néhány méter vastagságú felső része nem tartalmaz ehhez elég vízjeget – összhangban a felszínközeli H₂O-mennyiség globális eloszlását vizsgáló mérések eredményével.
- 15) Mindezek alapján úgy gondolom, hogy a Greg kráter törmeléknyelvei és az Euripus-hegyet szoknyaszerűen körbevevő lebenyes törmelékletjő napjainkban inaktív alakzatok, de múltbeli vízjég-készletük egy része még létezhet belsejükben – például az Euripus-hegyet övező, számításom szerint 2 587 km³ térfogatú képződményben akár 2 000 x 10⁹ t fagyott H₂O is tárolódhat. Ám a jelenlegi éghajlati viszonyok következtében jégtartalmuk fokozatosan elszublimál, így egyre jobban lepusztulnak, s végül fosszilis formákká válnak – viszont ha valóban lassú felmelegedés zajlik a bolygón, akkor a közeljövőben akár aktivizálódhatnak is.
- 16) A Nilosyrtis-mintaterület vonalas völgykitöltéséről rendelkezésre álló adatforrások sajnos nem tették lehetővé recens aktivitásának tanulmányozását, a Protonilus-mintaterület koncentrikus kráterkitöltését viszont egyértelműen idős, fosszilis képződménynek tartom, amelynek felszínközeli törmelékösszleteiből már teljesen hiányzik a vízjég, így egykori formakincsét eolikus folyamatok pusztítják le, illetve fokozatosan növekvő vastagságú eróziós lepellet fedik be.

Fejlődéstörténet

- 17) Felszíni szerkezet-típusaik lejtőirányú lepusztultság-növekedése alapján a periglaciális törmélékletjtők olyan kis sebességgel mozoghattak, hogy közben a Mars alacsony intenzitású eróziós folyamatai jelentős mértékben képesek voltak átalakítani a törmélékösszlet anyagát – vagyis biztosan nem hirtelen történt omlási-csuszamlási események során keletkeztek (mert ebben az esetben lepusztultságuk mértéke azonos lenne teljes felszínükön).
- 18) Földi analógiákra épülő becsléseim szerint a Greg kráter kis méretű törméléknyelvei kb. 0,5-1,5 millió év alatt jöhettek létre, az Euripus-hegyet szoknyaszerűen körbevevő, sokkal nagyobb kiterjedésű – általam 2 587 km³ térfogatúnak számított – lebenyes törmélékletjtő kialakulása pedig hozzávetőlegesen 100-300 millió évig tarthatott (utóbbi korrelál a térség hasonló képződményeinek kráterstatistikai elemzés alapján meghatározott korával). Mindezek alapján a periglaciális törmélékletjtők a marstörténet Amazoni időszakának utolsó részében képződtek, s az égitest legfiatalabb morfológiai egységei közé tartoznak. Tehát annak ellenére, hogy sok szempontból hasonlítanak a jeges összeletek földi lejtőformáihoz, nagyságrendekkel idősebbek azoknál, s fejlődésük során változatos formakincsű, komplex domborzatú tájakká formálták a bolygó Hesperiai időszakban létrejött kimart területeit.
- 19) Napjainkban a periglaciális törmélékletjtők nem egyensúlyi formák a Marson, vagyis keletkezésük során a jelenlegitől eltérő, minden bizonnyal hidegebb éghajlati viszonyok jellemezték az égitestet – így a vizsgált, eltérő korú formák kialakulási időrendjének meghatározása hozzájárulhat a bolygó fejlődéstörténetének pontosabb rekonstruálásához. A legidősebb képződménynek a Protonilus-mintaterület koncentrikus kráterkitöltését tartom, amely több százmillió évvel ezelőtt jöhetett létre – a kráterfal vízmosásainak elhelyezkedése alapján talán egy olyan időszakban, amikor a bolygó tengelyferdesége jelentősen nagyobb volt a kráter 38,3°-os marsrajzi szélesség-értékénél (mivel ebben az esetben a nyár legmelegebb időszakaiban a napsugarak már észak felől világították meg a térséget, vagyis a kráterfal déli kitettségű lejtői voltak árnyékosabbak s a nyári besugárzás csak ezeken a helyeken nem olvasztotta el teljesen a téli H₂O-felhalmozódás anyagát, aminek lassú szivárgása vízmosásokat hozhatott létre). A növekvő tengelyferdeség ugyanis a poláris térségek melegedését okozza, ezért az ottani vízjég-készletek szublimálni kezdenek, s a légkörbe került vízgőz a közepes marsrajzi szélességű övezetekben fagy ki újra, többek között periglaciális törmélékletjtőket hozva létre.
- 20) A Nilosyrtis-mintaterület vonalas völgykitöltése – felszíni mintázatainak lepusztultságára alapozva – közelítő becslésem szerint legfeljebb 25-50 millió éves lehet, tehát később alakult ki, mint a Protonilus-mintaterület koncentrikus kráterkitöltése, illetve az Euripus-hegyet

szoknyaszzerűen körbevevő lebenyes törmeléklejtő. Eltérő magasságú és csapásirányú, néhányszor tíz méter vastagságú s a völgy-aljzat széleitől középvonala felé haladva egyre idősebb korú formációi emellett azt is jelzik, hogy több fázisban, időbeli megszakításokkal jött létre – minden bizonnyal a közben zajlott éghajlat-változások hatására. Ám úgy gondolom, hogy nem egykori völgyi gleccser-hálózat törmék-borítás maradványformája, hanem a hátráló oldalfalak változó peremvonalával többé-kevésbé párhuzamos sávozottságú, a völgy tengelyére merőleges irányban gyarapodó, s így középen szembetalálkozó, majd egymást részlegesen átfedő periglaciális törmeléklejtő-lebenyek szövődékes rendszere, amelynek hossz-irányú elmozdulását gleccser-képződéshez kapcsolódó folyamatok helyett inkább „domborzati kényszer”-hatások magyarázhatják.

- 21) A négy mintaterület közül a Greg kráterben találtam a legfiatalabb formákat, amelyek szerintem a marstörténeti közelmúltban, legfeljebb 5-10 millió évvel ezelőtt jöhettek létre, amikor az égitest tengelyferdesége (modellszámítások szerint) hosszú időn keresztül sokkal nagyobb érték körül ingadozott, mint napjainkban.
- 22) Mindezek alapján az a véleményem, hogy a közepes marsrajzi szélességű övezetekben található periglaciális törmeléklejtők részletes morfológiai és morfometriai elemzése hasznos ismeretekkel járulhat hozzá a vörös bolygó fejlődéstörténetének pontosabb megértéséhez. Az általam végzett vizsgálatok részben megerősítik azt az egyre szélesebb körben elfogadottá váló hipotézist, hogy az utóbbi 200-300 millió évben a Mars tengelyferdesége több időszak során is jelentősen nagyobb volt, mint napjainkban, s ezek a poláris térségekben felmelegedést, a közepes marsrajzi szélességű övezetek felszínközeli rétegeiben pedig jégfelhalmozódást okoztak, gyakran völgyi gleccser-hálózatok kialakulását eredményezve. Azonban megfigyeléseim szerint gleccserképződés a négy mintaterület egyikén sem zajlott, ezért úgy gondolom, hogy különböző típusú és korú törmék-képződményeik periglaciális felszíni környezetben jöttek létre, illetve fejlődnek azóta is.

III.3. A sötét lejtősávok aktív folyamatainak értelmezése

- 23) Négy különböző jellegű mintaterület részletes morfológiai és morfometriai tanulmányozása alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a szubpoláris övezetek dűnemezőin található sötét lejtősávok a törmelékanyag vízjég-tartalmának részleges tavaszi-nyári megolvadása során átmenetileg megjelenő, legalább mikroszkopikus mennyiségű folyékony H_2O szemcseközi hézagokban zajló lejtőirányú szivárgásának recens felszíni nyomai. A lejtősávok kizárólag a sötét dűnemezőkön jelennek meg, s kialakulásuk szerintem jól magyarázható a Mars Astrobiology Group által az elmúlt években kidolgozott „lefolyás-modell” alapján – amely kutatócsoportnak 2003 óta én is a tagjai közé tartozom.

- 24) A Konkoly kráter vizsgálata során megállapítottam, hogy a sötét dűnemező a nyári időszakban hidegebb környezeténél, ami feltételezésem szerint fagyott H_2O -tartalmának következménye, s mivel felszíne bizonyos helyeken 0°C -nál magasabb hőmérsékletű, nyár elején valóban megolvadhat jég-anyagának egy része.
- 25) A Konkoly kráter mintaterületéről két egymást követő tavaszi időszakban készült nagyfelbontású optikai űrfelvételek összehasonlítása szerintem azt jelzi, hogy a sötét lejtősávok képződését elsősorban a felszíni hőmérséklet határozza meg, mivel fejlődésük hasonló tér- és időbeli sajátosságokat követ az egymást követő marsi évek során.
- 26) A Russell kráter dűnemezőjének részletes morfometriai elemzése alapján úgy gondolom, hogy a sötét lejtősávok elnyúltságát és méretét a domborzat (lejtőmeredekség), illetve a besugárzás mértéke (lejtőkitettség) is befolyásolja: a különböző meredekségű térszíneken elhelyezkedő alakzatok hosszúsága a lejtőszöggel arányosan változik s 8° -nál kisebb lejtésű terepen csak kör alakú sötét dűnefoltok jönnek létre, a hasonló meredekségű délnyugati és délkeleti lejtők közül pedig az előbbi, vagyis melegebb helyen láthatók nagyobb képződmények. Mindez alátámasztja, hogy a lejtősávok megjelenése valamilyen besugárzás-mennyiségtől függő folyamathoz kapcsolódik, ami szerintem a H_2O -olvadás lehet. Továbbá a dűnék anyagi összetétele is fontos tényező lehet, a lejtősávok ugyanis a szintvonalakkal párhuzamos övezetekbe rendeződve figyelhetők meg, ami talán az oldallejtő réteges szerkezetével magyarázható, s ebben az esetben a dűne különböző rétegeinek kialakulása során jellemző légköri H_2O -tartalom változására utalhat.
- 27) Az Escorial kráter közelében található mintaterület évszakos változásainak elemzése során megállapítottam, hogy a sötét lejtősávok hossz-növekedése tavasszal akár 4-8 m is lehet egy marsi nap során – tehát valóban napjainkban zajló, aktív folyamatok eredményei.
- 28) Az Inuvik kráter dűnemezőjének anyagi összetételét elemezve arra a következtetésre jutottam, hogy a rendelkezésre álló spektrális adatforrások jól használhatók az eltérő anyagú felszínrészletek lehatárolására, illetve hogy az összetétel időbeli különbségei jól korrelálnak az optikai űrfelvételeken megfigyelhető évszakos morfológiai változásokkal. Ennek alapján úgy gondolom, hogy a „lefolyás-modell” hiperspektrális távérzékelési eljárásra épülő (vagyis közvetett) anyagvizsgálati módszerek eredményeivel is igazolható.

* * *

- 29) Az eddig elhangzott következtetésekből levonható végső megállapításom, hogy a közepes marsrajzi szélességű övezetekben látható periglaciális törmeléklejtők és a szubpoláris övezetek dűnemezőin megfigyelhető sötét lejtősávok egyaránt jeges lejtőformák, s kialakulásuk ugyanazzal a folyamattal, a felszínközeli rétegek vízgég-tartalmának részleges megolvadásával magyarázható. Ám a törmeléklejtők nagyobb méretű képződmények s néhányszor tíz illetve néhány száz méter közötti vastagságú köves-jeges összeletek lassú tömegmozgása során keletkeztek az utóbbi néhány százmillió évben, a lejtősávok viszont kisebb méretű alakzatok, amelyeket a néhány mm-es vagy cm-es mélységben elhelyezkedő szemcseközi folyékony vízkészlet gyors lejtőirányú elmozdulása hoz létre napjainkban. Úgy gondolom, hogy mindkét formacsoport a Marson található fagyott és/vagy folyékony H₂O-készlet biztos előfordulási helyszíneinek, valamint könnyen elérhető forrásainak is tekinthetők, s további tanulmányozásuk fontos elméleti vonatkozása egyrészt a bolygó késői fejlődéstörténete során zajlott globális környezetváltozások részletes feltárása, másrészt a múltbeli életlehetőségek és feltételezett életformák kutatása, gyakorlati jelentősége pedig a tervezett jövőbeli emberes küldetések helyszínének kiválasztása lehet.
- 30) Véleményem szerint doktori értekezésem felszínalaktani elemzései látványosan szemléltetik, hogy a térinformatikai módszerek eredményesen alkalmazhatók más égitestek részletes morfológiai vizsgálata során, s így a bolygófelszín tan valóban a természetföldrajz planetáris kiterjesztésének, vagy akár egyik ígéretes jövőbeli ágazatának is tekinthető.

IV. ÉRTEKEZÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- HORVÁTH, A. – KERESZTURI, Á. – BÉRCZI, SZ. – SIK, A. – PÓCS, T. – GESZTESI, A. – GÁNTI, T. – SZATHMÁRY, E. 2005: Annual change of Martian DDS-Seepages. – *36th Lunar and Planetary Science Conference*, League City, #1128.
- HORVÁTH, A. – KERESZTURI, Á. – BÉRCZI, SZ. – SIK, A. – PÓCS, T. – GÁNTI, T. – SZATHMÁRY, E. 2009: Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars. – *Astrobiology*, vol. 9., no. 1., pp. 90-103., doi:10.1089/ast.2007.0212.
- KERESZTURI, Á. – SIK, A. – HORVÁTH, A. – REISS, D. – JAUMANN, R. – NEUKUM, G. 2007: Season-dependent behavior of Dark Dune Spots on Mars. – *38th Lunar and Planetary Science Conference*, League City, #1864.
- KERESZTURI, Á. – MÖHLMANN, D. – BÉRCZI, SZ. – GÁNTI, T. – KUTI, A. – SIK, A. – HORVÁTH, A. 2009: Recent rheologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water? – *Icarus*, vol. 201., no. 2., pp. 492-503., doi:10.1016/j.icarus.2009.01.014.
- KERESZTURI, Á. – MÖHLMANN, D. – BÉRCZI, SZ. – GÁNTI, T. – HORVÁTH, A. – KUTI, A. – SIK, A. 2010/a: Seepages and the Astrobiological Potential of Polar Dunes on Mars. – In: HEGEDŰS, S. – CSONKA, J. (szerk.) 2010: *Astrobiology: Physical Origin, Biological Evolution and Spatial Distribution*. – Nova Publishers, Hauppauge, ISBN: 978-1-60741-290-8.
- KERESZTURI, Á. – MÖHLMANN, D. – BÉRCZI, SZ. – GÁNTI, T. – HORVÁTH, A. – KUTI, A. – SIK, A. – SZATHMÁRY, E. 2010/b: Indications of brine related local seepage phenomena on the northern hemisphere of Mars. – *Icarus*, vol. 207., no. 1., pp. 149-164., doi:10.1016/j.icarus.2009.10.012.
- KERESZTURI, Á. – BÉRCZI, SZ. – HORVÁTH, A. – PÓCS, T. – SIK, A. – SZATHMÁRY, E. in press/a: The astrobiological potential of polar dunes on Mars. – In: HANSLMEIER, A. – KEMPE, S. – SECKBACH, J. (szerk.) in press: *Origin of Life on Earth and other Planets*. – Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology Series, Springer, Dordrecht.
- KERESZTURI, Á. – MÖHLMANN, D. – BÉRCZI, SZ. – HORVÁTH, A. – SIK, A. – SZATHMÁRY, E. in press/b: Possible role of brines in the darkening and flow-like features on the Martian polar dunes based on HiRISE images. – *Planetary and Space Science*, doi:10.1016/j.pss.2011.05.012.
- REISS, D. – JAUMANN, R. – KERESZTURI, Á. – SIK, A. – NEUKUM, G. 2007: Gullies and avalanche scars on Martian dark dunes. – *38th Lunar and Planetary Science Conference*, League City, #1993.
- SIK, A. 2001: Comparative study of periglacial mass movements on Mars and Earth. – *32nd Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, #1762.
- SIK, A. 2003/b: A Viking-űrszondák biológiai mérései. – In: BÉRCZI, SZ. (szerk.) 2003: *Kis atlasz a Naprendszeréről (6): Bolygófelszíni mikrokörnyezetek atlasza*. – UNICONSTANT, Budapest-Püspökladány, pp. 28-29.
- SIK, A. 2003/c: Comparative morphology of Martian debris aprons and terrestrial rock glaciers. – *Proceedings of the III. European Workshop on Exo-Astrobiology*, Madrid, pp. 291-292.
- SIK, A. 2004/a: Mintha a Marson járnánk. – In: FIAR, S. – NAGY, B. (szerk.) 2004: *Olvadó jövő*. – General Press Kiadó, Budapest, pp. 239-247.
- SIK, A. 2004/b: Periglaciális törmelékletők vizsgálata digitális domborzatmodellek alapján – a Marson. – *Magyar Földrajzi Konferencia 2004*, Szeged, 7 p.
- SIK, A. 2010: GIS a Marson. – *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában Konferencia és Szakkiállítás*, Debrecen, pp. 191-198.
- SIK, A. – KERESZTURI, Á. 2006: A Mars felszínalaktani vizsgálata űrfelvételek alapján. – *Geodézia és Kartográfia*, vol. LVIII., no. 9., pp. 12-20.
- SIK, A. – KERESZTURI, Á. – HARGITAI, H. 2005: A víz és a jég szerepe a Mars felszínfejlődésében. – *Földrajzi Közlemények*, vol. CXXIX (LIV), no. 3-4., pp. 159-176.
- SZATHMÁRY, E. – GÁNTI, T. – PÓCS, T. – HORVÁTH, A. – KERESZTURI, Á. – BÉRCZI, SZ. – SIK, A. 2007: Life in the dark dune spots of Mars: a testable hypothesis. – In: PUDRITZ, R. – HIGGS, P. – STONE, J. (szerk.) 2007: *Planetary Systems and the Origins of Life*. – Cambridge Astrobiology Series, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 241-262., ISBN: 978-0-521-87548-6.

V. VÁLOGATOTT IRODALOMJEGYZÉK

- ARFSTROM, J. – HARTMANN, W. K. 2005: Martian flow features, moraine-like ridges, and gullies: Terrestrial analogs and interrelationships. – *Icarus*, vol. 174., no. 2., pp. 321-335., doi:10.1016/j.icarus.2004.05.026.
- BYRNE, S. et al. 2009: Distribution of Mid-Latitude Ground Ice on Mars from New Impact Craters. – *Science*, vol. 325., no. 5 948., pp. 1 674-1 676., doi:10.1126/science.1175307.
- CARR, M. H. – HEAD, J. W. 2010: Geologic history of Mars. – *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 294., no. 3-4., pp. 185-203., doi:10.1016/j.epsl.2009.06.042.
- GÁBRIS, Gy. 2007: Földfelszín és éghajlat. – *ELTE Eötvös Kiadó*, Budapest, 225 p.
- HANSEN, C. J. et al. 2011: Seasonal Erosion and Restoration of Mars' Northern Polar Dunes. – *Science*, vol. 331., no. 6 017., pp. 575-578., doi:10.1126/science.1197636.
- HARGITAI, H. 2006: Planetary Maps: Visualization and Nomenclature. – *Cartographica*, vol. 41., no. 2., pp. 149-164., doi:10.3138/9862-21JU-4021-72M3.
- HARGITAI, H. et al. 2008: Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana. – *Földtani Közöny*, vol. 138., no. 4., pp. 323-338.
- HEAD, J. W. et al. 2010: Northern mid-latitude glaciation in the Late Amazonian period of Mars: Criteria for the recognition of debris-covered glacier and valley glacier landsystem deposits. – *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 294., no. 3-4., pp. 306-320., doi:10.1016/j.epsl.2009.06.041.
- HOLT, J. W. et al. 2008: Radar Sounding Evidence for Buried Glaciers in the Southern Mid-Latitudes of Mars. – *Science*, vol. 322., no. 5 905., pp. 1 235-1 238., doi:10.1126/science.1164246.
- KIEFFER, H. H. – CHRISTENSEN, P. R. – TITUS, T. N. 2006: CO₂ jets formed by sublimation beneath translucent slab ice in Mars' seasonal south polar ice cap. – *Nature*, vol. 442., no. 7 104., pp. 793-796., doi:10.1038/nature04945.
- LEVY, J. S. – HEAD, J. W. – MARCHANT, D. R. 2007: Lineated valley fill and lobate debris apron stratigraphy in Nilosyrtis Mensae, Mars: Evidence for phases of glacial modification of the dichotomy boundary. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 112., no. E8., 19 p. doi:10.1029/2006JE002852.
- MALIN, M. C. – EDGETT, K. S. 2000: Frosting and defrosting of Martian polar dunes. – *31st Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, #1056.
- MC EWEN, A. et al. 2011: Seasonal Flows on Warm Martian Slopes. – *Science*, vol. 333., no. 6 043., pp. 740-743., doi:10.1126/science.1204816.
- MORGAN, G. A. – HEAD, J. W. – MARCHANT, D. R. 2009: Lineated valley fill (LVF) and lobate debris aprons (LDA) in the Deuteronilus Mensae northern dichotomy boundary region, Mars: Constraints on the extent, age and episodicity of Amazonian glacial events. – *Icarus*, vol. 202., no. 1., pp. 22-38., doi:10.1016/j.icarus.2009.02.017.
- NEUKUM, G. et al. 2004: Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera. – *Nature*, vol. 432., pp. 971-979., doi:10.1038/nature03231.
- REISS, D. et al. 2010: Evidence for present day gully activity on the Russell crater dune field, Mars. – *Geophysical Research Letters*, vol. 37., no. 6., 7 p., doi:10.1029/2009GL042192.
- RENNÓ, N. O. et al. 2009: Possible physical and thermodynamical evidence for liquid water at the Phoenix landing site. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 114., no. C10., 11 p., doi:10.1029/2009JE003362.
- SQUYRES, S. W. et al. 1992: Ice in the Martian regolith. In: KIEFFER, H. H. et al. (szerk.) 1992: Mars. – *University of Arizona Press*, Tucson, pp. 523-554.
- TIMÁR, G. – SZÉKELY, B. – MOLNÁR, G. 2005: Definition of a map grid system for minimum distortion representation of the topography of the planet Mars. – *Geophysical Research Abstracts*, vol. 7., #EGU05-A-04931.
- TIRSCH, D. et al. 2008: A global view on the mineralogical composition of dark dunes on Mars. – *39th Lunar and Planetary Science Conference*, League City, #1693.